Mots-clés :
Diode laser,
Simulation 2D,
Irradiation transitoire.

Simulation de la réponse transitoire d'une diode laser à une impulsion ionisante

par Jacques BAGGIO, Jean-Marc RAINSANT, Claudine D'HOSE, *CEA*

La simulation d'une structure laser à double hétérojonction soumise à une irradiation transitoire a permis de localiser les différentes réponses au sein du composant et d'identifier ainsi les phénomènes liés aux réponses électrique et optique de la diode.

L'ESSENTIEL

- Les diodes laser à double hétérojonction soumises à des irradiations subissent des modifications difficiles à établir à partir des seuls résultats expérimentaux.
- Des outils de simulation 2 D permettent d'observer et de comprendre les effets perturbateurs.

SYNOPSIS

- When subject to ionizing radiation, double-heterojunction diodes undergo changes that are difficult to determine from experimental results alone.
- This article discusses 2D simulation tools for investigating these phenomena.

1. INTRODUCTION

Les expériences de physique auprès du laser Phébus puis du laser Mégajoule peuvent produire des rayonnements X, γ et neutrons. Les composants électroniques situés à proximité immédiate des cibles sont soumis à ces flux susceptibles de perturber leur fonctionnement. Ceci nous a conduit à étudier la réponse de diodes laser à une impulsion ionisante.

L'irradiation a pour effet de créer une densité volumique uniforme de paires électron-trou dans les matériaux. Outre la réponse électrique de type photocourant engendrée par cette génération, la puissance optique de la diode laser va également être perturbée.

La principale difficulté vient du fait que les structures de ces diodes sont assez complexes et comportent différents matériaux. La corrélation entre les réponses électrique et optique d'une diode laser sous irradiation transitoire est très difficile à établir à partir des seuls résultats expérimentaux. En effet, l'irradiation n'a pas le même effet dans l'ensemble du composant, en particulier en ce qui concerne la cavité où la moindre variation de la densité des porteurs peut perturber l'émission laser. Le simulateur permet de connaître la contribution de chacune des parties de la structure à la réponse de la diode laser.

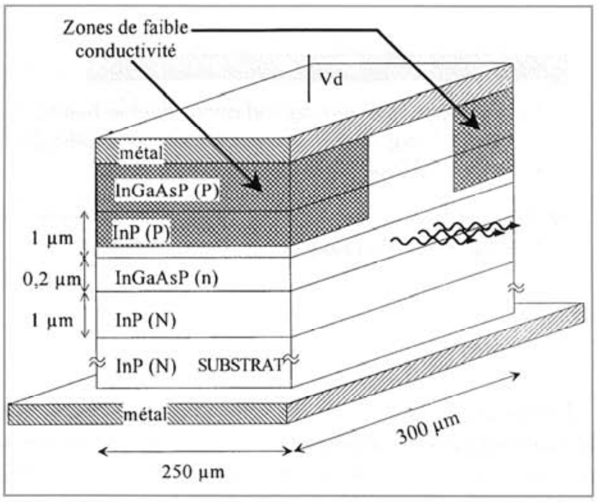
Les expériences réalisées [1] nous amènent à penser que le comportement observé est principalement dû à la variation de la répartition spatiale de la densité de courant dans la diode laser. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons utilisé un simulateur de composants 2D particulièrement adapté à la description des composants optoélectroniques [2]. Nous avons pu ainsi étudier la réponse électrique (photocourant) et optique (d'après l'observation de la densité de porteurs dans la cavité) de la diode laser.

Dans la gamme de débits de dose étudiée, la densité de paires créées par l'irradiation reste inférieure à 10^{18} cm^{-3} et par conséquent il n'y aura pas de variation significative de l'indice de réfraction des matériaux [3]. Nous pouvons donc espérer simuler ces effets grâce à l'utilisation classique d'un simulateur de composant.

2. STRUCTURE DE LA DIODE LASER ÉTUDIÉE

La diode laser que nous allons étudier est composée d'une double hétérojonction permettant à la fois le confinement des porteurs libres et des photons dans la partie dite active de la diode (Fig. 1). La différence de gap entre les matériaux (ici entre InP et InGaAsP) forme un puits de potentiel dans lequel les porteurs peuvent s'accumuler et se recombiner de façon radiative. L'indice de réfraction de la couche active étant plus élevé, les photons ainsi créés se déplacent parallèlement au plan des couches [4]. Les miroirs de la cavité de type Fabry-Perot sont réalisés par simple clivage des faces avant et arrière de la puce.

La longueur d'onde d'émission (fixée par le gap de la couche active) est de 1300 nm. L'émission laser apparaît à partir d'un certain seuil de densité de courant noté Jth au delà duquel le gain d'émission stimulée dans la cavité est supérieur aux pertes totales (miroirs et cavité) [5]. Afin de diminuer le courant de seuil Ith et pour obtenir une émission spatiale compatible avec le couplage des fibres optiques (typiquement 9 µm de diamètre), les lignes de courant sont concentrées sur quelques microns de large au centre de la structure. Dans ce cas, on parle de structure à guidage par le gain. Parmi les différentes techniques utilisées on peut citer le bombardement protonique permettant de créer deux zones latérales de faible conductivité [6].



1. Structure double hétérojonction à guidage par le gain émettant à 1300 nm.

3. SIMULATIONS

3.1. Présentation de l'outil de simulation

Le simulateur de composants utilisé s'appelle Blaze, de la société Silvaco. Le produit est spécialisé dans la simulation électrique 2D des matériaux composés II-VI et III-V et dispose de divers modules optionnels dont Luminous et Laser qui nous ont permis de réaliser cette étude.

Luminous permet de simuler l'interaction de photons avec les divers matériaux disponibles, et donc d'étudier en détail le comportement des photodétecteurs (réponses spectrales, dynamique de réponse, etc...). Afin de retranscrire le phénomène de création uniforme de paires dans le volume du composant, la fonction de génération standard de Luminous a été modifiée pour la rendre indépendante de la profondeur de pénétration. Le nombre de paires créées est alors un paramètre à fournir au simulateur en fonction de chaque matériau [1].

Ce logiciel fonctionne sur le principe habituel de résolution des équations de Poisson et de transport pour les deux types de porteurs en chaque point d'un maillage défini par l'utilisateur. Le module Laser reprend ce même principe pour le calcul de la densité de photons en fonction de la densité de porteurs libres dans le milieu actif. Un maillage supplémentaire en deux dimensions est défini afin de permettre ce calcul, tandis que la longueur de la cavité Fabry-Perot (troisième dimension) intervient dans la détermination du spectre d'émission.

Les modèles utilisés par le module Laser ne permettent pas encore de résoudre de façon transitoire les équations électro-optiques [7],[8]. Cette limitation ne permet donc pas de prédire la réponse temporelle de la cavité, et en particulier les effets transitoires comme les oscillations de relaxation [1]. Les simulations qui vont suivre se présentent donc uniquement comme un moyen de prédiction qualitatif du comportement de l'hétérojonction, une fois le régime d'équilibre atteint. Ce régime d'équilibre est atteint en pratique au bout de quelques nanosecondes.

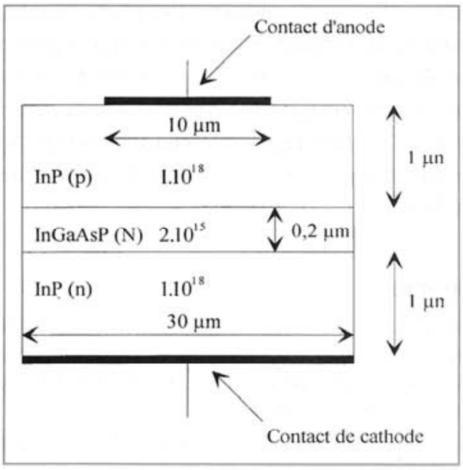
Pour cette raison, nous avons décidé de simuler séparément l'hétérostructure et les régions de confinement du courant, afin d'obtenir au moins une réponse temporelle en ce qui concerne cette partie de la structure.

3.2. Double hétérojonction laser

La Fig. 2 représente la structure de test simulée. La longueur d'onde d'émission, fixée par la composition de la couche $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$, est égale à 1300 nm (x=0,27 ; y=0,6). Le confinement des porteurs et des photons est assuré par les deux couches d'InP (indice de réfraction plus faible et gap plus important que pour la couche active). La largeur du contact d'anode permet de limiter la zone d'émission à environ 10 µm. Les dimensions et les dopages ont été choisis en fonction de données issues de la littérature [6],[4].

Les caractéristiques hors irradiation de cette hétérojonction ont été simulées, afin de vérifier en premier lieu la cohérence des résultats obtenus avec le module Laser. La densité de courant de seuil laser Jth (3.10^3 A/cm^2) et la puissance optique de sortie sont conformes aux valeurs rencontrées pour ce type de matériau.

Nous avons utilisé le taux de génération de paires g_0 propre à chacun des matériaux composant cette structure pour simuler au mieux les effets de l'irradiation [1].



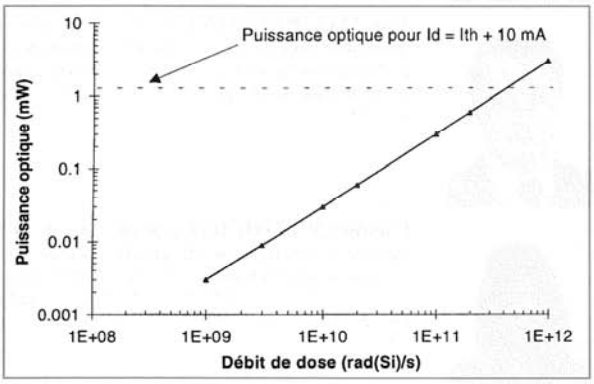
2. Double hétérojonction simulée avec le module Laser.

L'excès de paires électron-trou créées par l'irradiation conduit naturellement à augmenter la densité de porteurs libres dans la cavité. Dans le cas où la polarisation de la diode est très inférieure au seuil laser, cette augmentation permet d'atteindre la concentration qui satisfait à la condition de Bernard et Duraffourd [4]. La recombinaison stimulée devient prédominante et le gain du milieu augmente jusqu'à atteindre les pertes de la cavité. L'émission laser est alors possible pendant la durée de l'irradiation. Dans le cas où la diode laser est polarisée au-dessus du seuil laser, l'irradiation ne fait qu'augmenter la concentration de porteurs dans la cavité, et la puissance optique augmente en fonction du débit de dose.

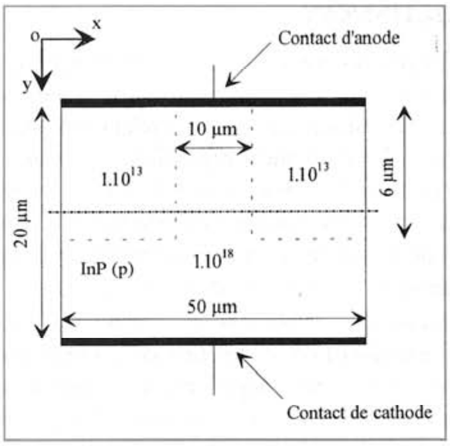
Les simulations confirment ces hypothèses de fonctionnement pour des polarisations aussi bien en dessous qu'au-dessus du seuil laser. La Fig. 3 représente la puissance optique supplémentaire obtenue sous irradiation lorsque la diode est polarisée à Ith + 10 mA. A titre de comparaison, la puissance optique hors irradiation correspondant à ce courant de polarisation est indiquée sur la figure par le trait pointillé.

3.3. Structure de confinement latéral du courant

Ce chapitre est consacré aux simulations de l'effet de l'irradiation sur la structure de confinement latéral du courant dans une diode laser. Ces simulations, qui sont cette fois-ci résolues temporellement, ne prennent pas en compte l'hétérojonction étudiée précédemment, mais seulement les régions de faible conductivité représentées sur la Fig. 4. Cette structure destinée à concentrer les lignes de courant sur quelques microns afin d'abaisser le courant de seuil Ith, est utilisée couramment pour la fabrication des diodes laser actuelles [6], [9].



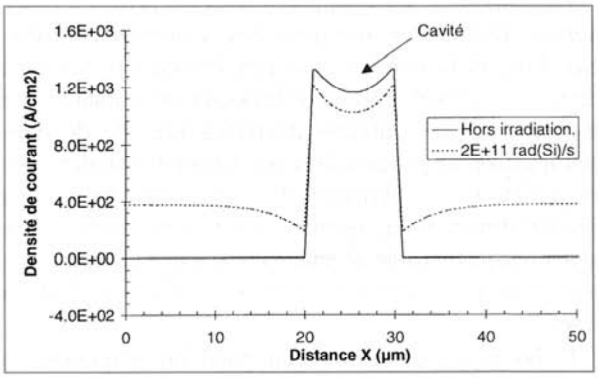
3. Augmentation de la puissance optique sous irradiation.



4. Structure de confinement latéral du courant.

On peut noter sur la Fig. 5 la distribution de la densité de courant en fonctionnement normal. La valeur maximum ($1{,}2.10^3$ A/cm^2) correspond à un point de polarisation égale à Ith + 5 mA.

Sous irradiation, le courant total croît surtout à cause de l'augmentation de la conductivité dans les régions peu dopées (porteurs en excès). La simulation montre que, au contraire, la densité de courant diminue légèrement au centre de la structure. Cet effet est illustré par la Fig. 5 où la densité maximum passe de $1{,}2.10^3$ à 1.10^3. Cette faible variation est suffisante pour passer en dessous de la densité de courant de seuil Jth où la diode ne fonctionne plus en laser. Le débit de dose critique Dc qui provoque ce passage en dessous du seuil dépend évidemment du courant de polarisation. Pour Id = Ith + 5 mA, le débit critique Dc est égal à 2.10^{11} rad(Si)/s.



5. Diminution de la densité de courant au centre de la structure pendant l'irradiation.

La simulation d'une structure réelle à guidage par le gain a permis de mettre en avant l'effet de déconfinement du courant pendant l'irradiation, ce fonctionnement ayant été observé de façon expérimentale [1]. Le manque d'informations technologiques précises nous empêche d'effectuer des comparaisons quantitatives entre les simulations et les expériences, mais les résultats sont cohérents aussi bien en ce qui concerne le photocourant que la réponse optique.

4. DISCUSSION

Les simulations précédentes nous permettent de prédire qualitativement le fonctionnement d'une diode laser sous irradiation transitoire. La réponse optique transitoire de la cavité est malheureusement impossible à simuler à l'heure actuelle avec cet outil, mais les résultats statiques représentent assez bien des conditions d'irradiation de quelques dizaines de nanosecondes (durée d'irradiation longue face à la durée de vie des porteurs dans la diode laser).

Le photocourant issu des deux structures simulées (double hétérojonction et structure de confinement latéral du courant) tend à faire augmenter le courant direct de la diode laser. La réponse due uniquement à la génération dans la cavité est faible, et ce en grande partie parce que la majorité des paires électron-trou créées se recombinent dans la zone active. Le photocourant total dépend donc de l'ensemble de la structure et non pas spécifiquement de la génération dans la cavité.

Les simulations incitent à penser que la réponse optique de la diode laser sous irradiation est dominée par l'effet de déconfinement latéral du courant. On a pu voir que le débit de dose critique pour lequel la densité de courant dans la cavité devient inférieure à Jth est de l'ordre de 10^{11} rad(Si)/s. Or, à ce débit, les simulations de l'hétérojonction seule montrent que l'augmentation de la densité de porteurs due à l'irradiation dans la cavité n'est pas significative. La variation de l'émission laser est donc principalement liée à la diminution transitoire de la densité de courant.

5. CONCLUSION

En conclusion, les simulations nous ont permis d'observer que l'irradiation avait pour effet d'augmenter le courant direct de la diode laser, tout en diminuant sa puissance optique. La variation locale de la densité de courant au sein de la structure de confinement latéral a pour effet de réduire l'injection de porteurs dans la cavité et devrait donc correspondre à une diminution de la puissance optique. Ce résultat démontre qu'une modélisation à une seule dimension n'est pas capable de rendre compte de l'effet de l'irradiation en ce qui concerne la réponse optique de la diode laser.

Le but de ces simulations était plutôt de comprendre les diverses perturbations engendrées par l'irradiation, et en particulier de cerner les effets dus à la géométrie d'une diode laser. Dans cette optique, l'outil de simulation est suffisamment performant. Pourtant, on peut regretter de ne pouvoir résoudre temporellement la structure complète de la diode laser. Il faut également noter l'absence de certains matériaux III-V dans une bibliothèque pourtant déjà bien fournie, en particulier certains composés quaternaires utilisés dans les diodes laser à base de GaInP.

Références

[1] J. BAGGIO, J. M. RAINSANT, C. D'HOSE, P. LALANDE, O. MUSSEAU, J. L. LERAY, "Comparison of Laser Diode Response to Pulsed Electrical and Radiative Excitations", IEEE Trans. Nuc. Sci., Vol. 43, N° 6, Dec.1996.

[2] Silvaco, ATLAS 2D Device simulator, Manuel d'utilisateur, 1996.

[3] M. S. WHALEN AND J. STONE, "Index of refraction of n-type InP at 0.633 µm and 1.15 µm wavelengths as a function of carrier concentration", J. Appl. Phys., Vol. 53, N° 6, pp. 4340, June 1982.

[4] H. C. CASEY AND M. B. PANISH, "Heterostructure lasers", New York: Academic Press, 1978.

[5] K. PETERMANN, "Laser diode modulation and noise", Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

[6] G. P. AGRAWAL and N. K. DUTTA, Long-wavelength semiconductor lasers, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.

[7] D. P. WILT, A. YARIV, "A self-consistent static model of the double-heterostructure laser", IEEE J. Quan. Elec., Vol. 17, N° 9, pp. 1941, 1981.

[8] K. B. KAHEN, "Two-dimensional simulation of laser diodes in the steady state", IEEE J. Quan. Elec., Vol. 24, N° 4, pp. 641, 1988.

[9] J. KRAUZE, translated from B. Mroziewicz, Physics of semiconductor lasers, New York : North Holland, 199.



Jacques BAGGIO est docteur en électronique de l'université Montpellier II. Il a travaillé sur l'effet d'une impulsion ionisante sur des composants électroniques et optoélectroniques au CEA/DAM de 1993 à 1996.



Jean-Marc RAINSANT est diplômé de Supélec (promotion 1995) et titulaire d'un DEA d'électronique de l'université Paris VI. Il a effectué son service national en tant que scientifique du contigent au CEA/DAM en 95/96.



Claudine D'HOSE, DUT génie électrique en 1983, a débuté à Nuclétudes où elle a étudié la vulnérabilité des composants électroniques aux rayonnements. Elle a intégré en 1994 le CEA/DAM où depuis elle travaille plus particulièrement sur les activités optoélectroniques.